

⑨ 日本国特許庁(JP)

⑩ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A) 平4-147001

⑤ Int.Cl.<sup>5</sup>

G 01 B 11/24

識別記号

E

庁内整理番号

9108-2F

⑬ 公開 平成4年(1992)5月20日

審査請求 未請求 請求項の数 1 (全7頁)

⑭ 発明の名称 実体格子型のモアレトポグラフィーによる高感度三次元測定法

⑮ 特 願 平2-269480

⑯ 出 願 平2(1990)10月9日

⑰ 発 明 者 吉 澤 徹 東京都府中市新町1-19-5 府中第二住宅1-102  
⑱ 出 願 人 吉 澤 徹 東京都府中市新町1-19-5 府中第二住宅1-102  
⑲ 代 理 人 弁理士 樋口 盛之助 外1名

明 細 書

1. 発明の名称

実体格子型のモアレトポグラフィーによる高感度三次元測定法

2. 特許請求の範囲

測定対象から適宜離隔して配置される格子に対し、当該格子を挟んで前記対象と対峙する側に、適宜の光源と前記格子に平行な面上で前記光源から適宜距離で離れた観察点とを配置し、前記光源により測定対象に投影される前記格子の影と前記格子とにより形成されるモアレ縞を観察する実体格子型のモアレトポグラフィーによる三次元測定法において、前記格子を、その格子面に対して垂直方向に移動させると共に、前記光源又は観察点を格子面と平行に移動させることより、各次数のモアレ縞の位相をそれらがほぼ揃った状態でシフトさせ、位相シフトされるモアレ縞をとらえて計算処理することを特徴とする実体格子型のモアレトポグラフィーによる高感度三次元測定法。

3. 発明の詳細な説明

〔産業上の利用分野〕

本発明は実体格子型のモアレトポグラフィーを利用した高感度な三次元測定法に関するものである。

〔従来の技術〕

モアレトポグラフィーを利用した三次元測定法(以下、モアレ法という)には、実体格子型と格子投影型があり、いずれも対象に表示させるモアレ等高線によって、直観的に三次元形状をとらえることができることから、様々な分野、とくに生体関連分野において広く利用されている。

〔発明が解決しようとする課題〕

従来、測定対象に表わされるモアレ縞等高線を写真機あるいはテレビカメラ等により撮影すれば、これによって対象の三次元形状を直観的に把握することはできるが、(イ)一枚のモアレ写真からでは面の凹凸の判定が難しい、(ロ)測定感度がやや低いため、高感度の三次元測定には不向き(因に、現時点ではモアレ縞等高線の間隔は10 $\mu$ m程度が限界とされている)、(ハ)モアレ縞のビジビリティ

一が縞ごとに均一でないためモアレ像を画像処理の対象として扱いにくい等々の問題が指摘されている。

この問題点は、格子投影型のモアレ法の場合、二枚の格子を利用しているために、その一方を移動させることにより、縞走査、つまり、モアレ縞等高線の位相をシフトさせることによって、等高線間隔を等価的に細かく分割するとともに、対象の凹凸判定や測定感度の向上に寄与することが解明されているが、実体格子型のモアレ法の場合には格子が一枚であるため、格子投影型のモアレ法のような位相シフトを行っても、すべての次数の縞等高線の位相を揃えずに位相を変えることはできない。

本発明はこのような点に鑑み、実体格子型のモアレ法において位相シフトを導入した高感度の三次元測定法を開発することを課題としてなされたものである。

ここで、格子投影型のモアレ法とは、第6図に示すように、投影用と観察用とに、それぞれ小

とを配置し、前記光源により測定対象に投影される前記格子の影と前記格子とにより形成されるモアレ縞を観察する実体格子型のモアレボトグラフィーによる三次元測定法において、前記格子を、その格子面に対して垂直方向に移動させると共に、前記光源又は観察点を格子面と平行に移動させることにより、各次数のモアレ縞の位相をそれらがほぼ揃った状態でシフトさせ、位相シフトされるモアレ縞をとらえて計算処理観察することとを特徴とするものである。

#### 〔作用〕

格子面の垂直移動と光源又は観察点の水平移動を、同時に行うことにより、各次数のモアレ縞の位相にほぼ大きな変化を来すことなく、各次数の縞の位相がほぼ揃った状態で測定対象に対する縞位相のシフトができるので、複数枚の縞画像を高速走査法（位相シフト法）の原理に基いて処理することができ、これによって測定対象に対するモアレ縞による測定点の密度が増大するとともに、モアレ縞1周期について約1/40～1/100程度の物理

な格子 $G_1$ 、 $G_2$ を配置し、格子 $G_1$ をレンズ $L_1$ により物体に投影し、物体形状に応じて変形した格子線をレンズ $L_2$ を通してもう一つの格子 $G_2$ 上に結像させ、縞等高線を基準面から所定距離のところに生じさせるようにしたものである。

一方、実体格子型のモアレ法とは、第7図に示すように、基準面に一つの格子 $G$ を設置し、第6図のレンズ $L_1$ の位置に点光源 $S_1$ を、レンズ $L_2$ の位置に観察眼 $e$ を置いて、前記格子 $G$ の光源 $S_1$ による影を物体上に落し、物体形状に応じて変形した格子 $G$ の影を形成させてこれを格子 $G$ を通して観察することにより、この格子 $G$ と変形した格子の影とによって生じるモアレ縞を観測する方法をいう。

#### 〔課題を解決するための手段〕

上記の課題を解決することを目的としてなされた本発明方法の構成は、測定対象から適宜距離して配置される格子に対し、当該格子を挟んで前記対象と対峙する側に、適宜の光源と前記格子に平行な面上で前記光源から適宜距離で離れた観察点

的な分割が可能となり、実体格子型のモアレ法では困難とされていた面の凹凸の判定や測定感度の向上を図ることができる。

#### 〔実施例〕

次に、本発明方法について、その原理、並びに、この方法を実施するための装置の一例を説明する。

第1図において、光源 $S$ と格子 $G$ をそれぞれ $\Delta d$ 、 $\Delta \ell$ だけ移動させたときの格子 $G$ から $n$ 番目のモアレ縞までの距離を $hn'$ とすると、これらを移動させる前の格子 $G$ から $n$ 番目のモアレ縞までの距離 $hn$ は、

$$hn = \frac{\ell np}{d - np} \quad (1.1)$$

であるから、

$$hn' = \frac{(\ell + \Delta \ell) np}{d - \Delta d - np} \quad (1.2)$$

となる。

一方、格子移動前の格子から $n+1$ の次のモアレ縞までの距離 $hn+1$ は、式(1.1)と比較して

$$hn+1 = \frac{\ell (n+1) p}{d - (n+1) p} \quad (1.3)$$

となる。

ここで、格子移動前の $n$ 次と $n+1$ 次のモアレ縞間の位相 $\phi$ の位置に、格子移動後の $n$ 次のモアレ縞があるとする、第2図より、

$$hn + (hn+1 - hn)(\phi/2\pi) = hn' + \Delta \ell \quad (1.4)$$

と表される。

式(1.1), (1.2), (1.3)を式(1.4)へそれぞれ代入して分母をはらい、 $n$ の階乗について整理すると、

$$\begin{aligned} n! \cdot f(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p) \\ + n! \cdot g(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p, \phi) \\ + h(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p, \phi) = 0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

となる。

式(1.4)が縞次数 $n$ に関係なく成立するためには、すなわち縞次数 $n$ に関係なく位相をそろえてモアレ縞をシフトさせるためには、式(1.5)において $n$ の係数項がすべて0とならなければならない、よって

$$f(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p) = 0 \quad (1.6)$$

$$g(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p, \phi) = 0 \quad (1.7)$$

$$h(\ell, \Delta \ell, d, \Delta d, p, \phi) = 0 \quad (1.8)$$

式(1.12), (1.13)によって任意の位相に対する格子 $G$ の移動量、光源 $S$ の移動量 $\Delta \ell$ ,  $\Delta d$ がそれぞれ与えられる。

ここで、上記両式には縞次数を表す $n$ が含まれているが、実際には $n$ に適当な数値(1, 2, 3, ...)を代入した $\Delta \ell$ ,  $\Delta d$ を用いることとなり、その用いた $n$ の値に対応する縞次数付近が最も誤差が小さくなる。

この因子 $n$ と縞次数 $n$ とを区別するため、式(1.12), (1.13)中の $n$ を $m$ と書き改め、

$$\Delta \ell = \frac{(\ell dp - \ell mp)(\phi/2\pi)}{d' - dmp - dp + mp(\phi/2\pi)} \quad (1.14)$$

$$\Delta d = \frac{(dp - mp)(\phi/2\pi)}{d - mp - p + p(\phi/2\pi)} \quad (1.15)$$

とした。

実格子型の実験に本発明方法による位相シフトを導入することにより、測定点の密度を増し、モアレ縞1周期の1/40~1/100程度の分割が可能となる。

本発明では、実験によって得られる位相と正規の位相との誤差が1縞の1/100(すなわち $\pi/50$ )以

この式(1.6), (1.7), (1.8)が同時に成立するとき、式(1.4)は成り立つ。式(1.6), (1.7), (1.8)をそれぞれ $\Delta d$ について解くと、

$$\Delta d = \frac{\Delta \ell d}{\ell + \Delta \ell} \quad (1.9)$$

$$\Delta d = \frac{\ell dp(\phi/2\pi) - 2\Delta \ell d' + \Delta \ell dp}{\ell p - \ell d + \Delta \ell p - 2\Delta d} \quad \begin{matrix} (1.10) \\ (1.11) \end{matrix}$$

しかし、条件式(1.9), (1.10), (1.11)は同時に成立しない。そこで、本発明では、式(1.5)において縞次数の増加に伴って最も影響が大きいと思われる $n!$ の係数項を0とすることを考えて条件式(1.9)を用いて格子 $G$ と光源 $S$ の移動量 $\Delta \ell$ ,  $\Delta d$ をそれぞれ求めることにした。

式(1.4)へ式(1.9)と(1.3)を代入して分母をはらい $\Delta \ell$ について解くと、

$$\Delta \ell = \frac{(\ell dp - \ell np)(\phi/2\pi)}{d' - dnp - dp + np(\phi/2\pi)} \quad (1.12)$$

となる。

式(1.9)へ式(1.12)を代入して $\Delta d$ を求めると

$$\Delta d = \frac{(dp - np)(\phi/2\pi)}{d - np - p + p(\phi/2\pi)} \quad (1.13)$$

となる。

内であれば計測結果に支障をきたさないものとした。

本発明方法によって得られる位相 $\phi'$ は、第2図より、

$$\phi' = \frac{(hn' + \Delta \ell - hn) \cdot 2\pi}{hn+1 - hn} \quad (1.16)$$

となる。

したがって、この場合に生じる位相誤差 $\Delta \phi$ は

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= \phi' - \phi \\ &= \frac{(hn' + \Delta \ell - hn) \cdot 2\pi}{hn+1 - hn} - \phi \end{aligned} \quad (1.17)$$

となる。式(1.4)は、この式(1.17)において $\Delta \phi = 0$ としたものである。

ここで、この位相誤差 $\Delta \phi$ が計測結果に支障をきたさないためには、

$$\Delta \phi < |\pi/50| (= \text{最大許容誤差}) \quad (1.18)$$

の条件が満たされねばならない。

しかしながら、 $\Delta \phi$ は多くのパラメータを含んでいるので式(1.18)の条件を満たす範囲を定量的に知ることは困難である。実際には、多くのシミュレーションにより、式(1.14), (1.15)を用いれ

ば、広範囲、高繰回数にわたって位相誤差  $\Delta\phi$  は最大許容誤差の1/1000~1/100であることを確認した。

本発明方法の実施に際し、3次元座標の算出は、位相計算において物体の凹凸は自動的に判別されているが、位相を座標に換算する際に繰回数を知る必要がある。

繰回数を決定する方法を、第3図を参照して説明する。

測定物体Obj上の、格子Gに一番近い点を基準として物体形状の位相分布  $\phi_s(x, y)$  を計算し、次にその基準面と格子Gとの間の距離  $z_i$  を位相に換算して、それを  $\phi_i + 2\pi i$  とする。  $\phi_i + 2\pi i$  の算出は次のように行う。

(n-1) 次と n 次の繰間隔は

$$h_n - h_{n-1} = \frac{l \cdot dp}{(d - np + p)(d - np)} \quad (2.1)$$

また、n 次と (n+1) 次の繰間隔は

$$h_{n+1} - h_n = \frac{l \cdot dp}{(d - np - p)(d - np)} \quad (2.2)$$

ここで、式(1.1)、(2.1)を用いて

第3図より、物体上の点(x, y)における基準面(格子面)からの距離  $z(x, y)$  は

$$\begin{aligned} z(x, y) &= h_n + (h_{n+1} - h_n) \cdot (\phi / 2\pi) \\ &= \frac{l \cdot np}{d - np} + \frac{l \cdot dp \cdot (\phi / 2\pi)}{(d - np - p)(d - np)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

与えられ、式(2.7)中の  $n$ 、 $\phi$  に、式(2.6)中の  $n(x, y)$ 、 $\phi(x, y)$  をそれぞれ代入することにより、 $z(x, y)$  が得られる。

画像処理によって算出される  $x$ 、 $y$  座標は画素単位であるからこれに拡大率を掛け合わせて実際の長さになさなければならない。 $x$ 、 $y$  座標の原点は第3図においてカメラCaの光軸上にある。格子面上での倍率  $m$  は、画像入出力装置のコマンドを利用して  $x$ 、 $y$  方向概知の画素数で、格子面上の方眼を映し出すことによって得られる。

ここで、画素面の座標系を  $(x_s, y_s)$ 、格子面上の座標系を  $(x_g, y_g)$  とおくと

$$\begin{aligned} x &= m x_s \\ y &= m y_s \end{aligned} \quad (2.8)$$

第3図から、深さ  $z$  の位置にある 体上の点(x,

$$\begin{aligned} 0 \leq z_i &= \frac{l \cdot np}{d - np} \\ &< \frac{l \cdot dp}{(d - np + p)(d - np)} \end{aligned} \quad (2.3)$$

を満たす  $n(=i)$  を求める。第3図と式(2.2)の関係により

$$\begin{aligned} \phi_i &= \frac{(z_i - h_i) \cdot 2\pi}{h_{i+1} - h_i} \\ &= \frac{\{z_i(d - ip) - l \cdot ip\} (d - ip - p) \cdot 2\pi}{l \cdot dp} \end{aligned} \quad (2.4)$$

となる。

格子Gを基準としたときの、物体形状の位相分布を  $\phi_s(x, y)$  とすると、 $\phi_s(x, y)$  は、物体上の基準面から物体形状の位相分布  $\phi_s(x, y)$  に、格子から物体上の基準面までの位相差  $\phi_i + 2\pi i$  を加えたものであるから、

$$\phi_s(x, y) = \phi_s(x, y) + \phi_i + 2\pi i \quad (2.5)$$

$\phi_s$  を  $2\pi$  で割ることによって物体上の点(x, y)に対応する繰回数  $n(x, y)$  とその面からの位相  $\phi(x, y)$  が求まり、式(2.5)は

$$\phi_s(x, y) = 2\pi n(x, y) + \phi(x, y) \quad (2.6)$$

と変換される。

$y)$  は

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_s(l + z)}{l} \\ y &= \frac{y_s(l + z)}{l} \end{aligned} \quad (2.9)$$

と表され、物体の3次元座標が求まる。

このようにして物体(測定対象)の3次元座標が求まれば、これをCRT上、或は、プロッタによりワイヤフレームモデルとして前記物体を描かせることにより、この測定対象を三次元的に表現することができる。

次に、本発明方法を実施するための装置の一例およびそのシステム構成について第4図、第5図により説明する。

本発明方法を実施するモアレ装置では、光源(S)にハロゲンランプ(100V/650W)を使用し、光源微動機構部(M)にはマイクロメータを取り付け、1/100mm単位で水平面上を移動できるようになっている。また、光源Sは、カメラCaの焦点位置にその光源Sの中心位置を合わせられるように高さ方向に調節できるようになっている。ここでマイク

ロメータの代りにステップモータやピエゾ素子を用いることもできる。

格子(G)は、一例として、ピッチ0.4mm、格子部の平面大きさを200×290mmに形成した。この格子Gは、ピッチ0.4mmの長ネジに直径0.2mmの糸を張り渡し、反射率の低い塗料で塗装することにより製作した。この格子Gはガラス板や金属板等に多数のスリットを形成させて製作することもできる。

格子Gは格子枠F内に組み込まれ、格子枠内の水平移動機構によって当該格子Gを面内で移動でき、モアレ縞の平均化処理を行うようになっている。また、格子枠Fには4本の連結棒Lを取付けて支え、この連結棒Lを回転させることによって、前記格子を垂直方向に、ダイヤルゲージDを用いてチェックしながら1/100mm単位で移動できるように構成されている。

一方、光源Sと観察点(カメラCa)の距離は70~300mm、また、格子Gと観察点(カメラCa)の距離は60~320mmの範囲で調節でき、感度、物体の大きさに応じて可変できるようになっている。

格子Gと光源Sのシフト量 $\Delta d$ 、 $\Delta d$ はあらかじめ式(1.14)、(1.15)により4種類の位相について算出しておき、双方を4回シフトさせ、モアレ縞画像をカメラCaに取り込む。その際、格子Gを面内で移動させてモアレ縞の平均化処理を行う。  
〔発明の効果〕

本発明は以上の通りであって、従来、実体格子型のモアレ法においては、位相シフト法の導入が困難であるとされていたが、本発明方法により、格子面の垂直移動と光源又は観察点の水平移動を同時に行って、各次数の縞の位相をほぼ揃った状態で位相シフトができるため、測定対象に対する測定点の密度を増やし、モアレ縞一周期当り1/40~1/100程度の分割をするから、きわめて高感度の三次元測定が可能になり、また、物体の凹凸の判定も容易にできることとなる。

#### 4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明方法の測定原理を示す模式図で、実体格子型のモアレ法における縞位相のずれを示す正面図、第2図は本発明方法による位相シフト

のよう形成した装置により得られる縞間隔はおよそ0.3~1.8mmである。

上記装置のシステム構成を第5図のフローチャートに示す。

CCDカメラCaより得られた256×256画素の画像データは画像入出力装置51(アストロデザイン社、IP4004)によって256階調にAD変換され、それと接続されているパーソナルコンピュータ52(NEC、PC-9801)によって、フロッピーディスクに光強度分布データとして取り込まれる。そして、得られた、位相0、 $\pi/2$ 、 $\pi$ 、 $3\pi/2$ の4つのデータはコンピュータで位相計算がなされ、式(2.7)、(2.9)によって3次元座標が得られる。これによりCRT上に、またはプロッタでワイヤフレームモデルを表示するための出力をさせることができる。

実際には、測定物体の大きさに合わせてカメラCaの位置を決める。次に、光源Sの中心とカメラCaの焦点の位置合わせを行なう。

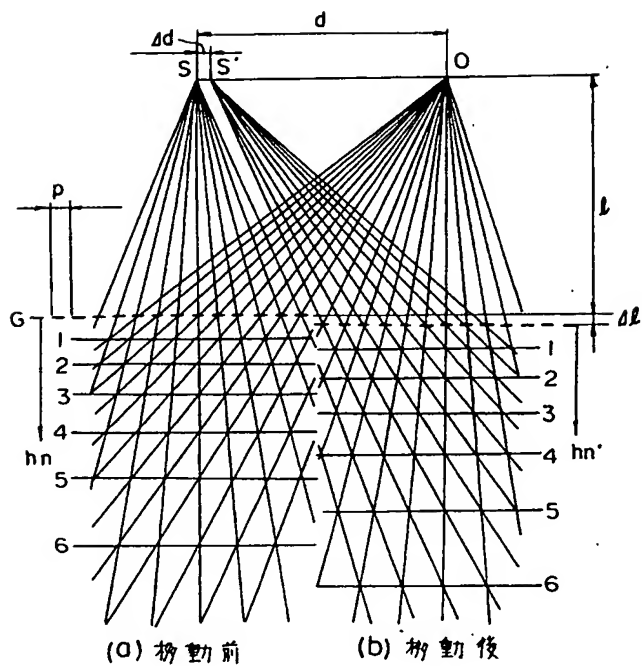
光源SとカメラCaの距離は、測定に適当な縞間隔となるように設定する。

の一例を示す模式図で、n次の縞の移動の様子を示す正面図、第3図は本発明方法における三次元座標の算出例を示す模式的概念図、第4図は本発明方法を実施するための装置の概略構成の一例を示す斜視図、第5図は本発明方法の実施をする際のデータ処理の流れを示すシステムブロック図、第6図は格子投影型のモアレ法を模式的に示す正面図、第7図は実体格子型のモアレ法を模式的に示す正面図である。

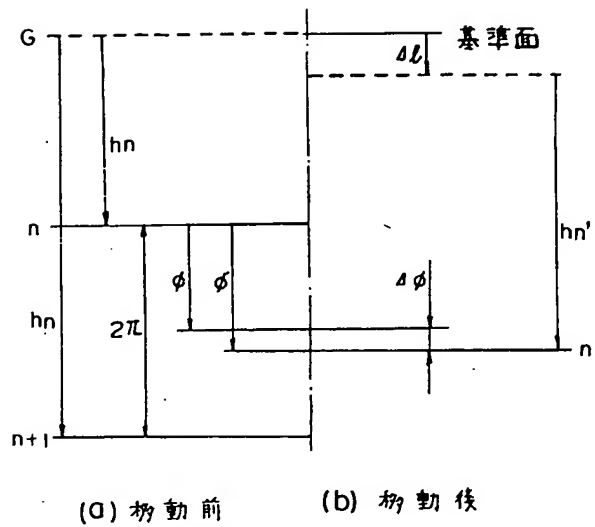
S…光源、G…格子、Ca…カメラ、 $\Delta d$ …格子Gのシフト量、 $\Delta d$ …光源Sのシフト量

代理人 橘 口 盛之助  
同 小 泉 良 邦

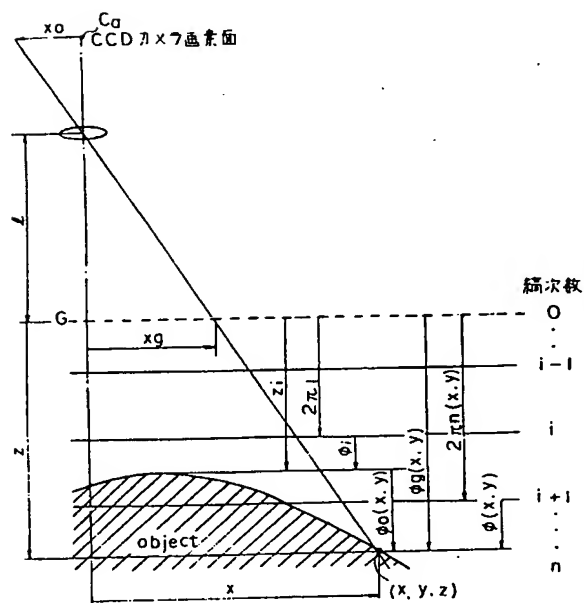
第 一 圖



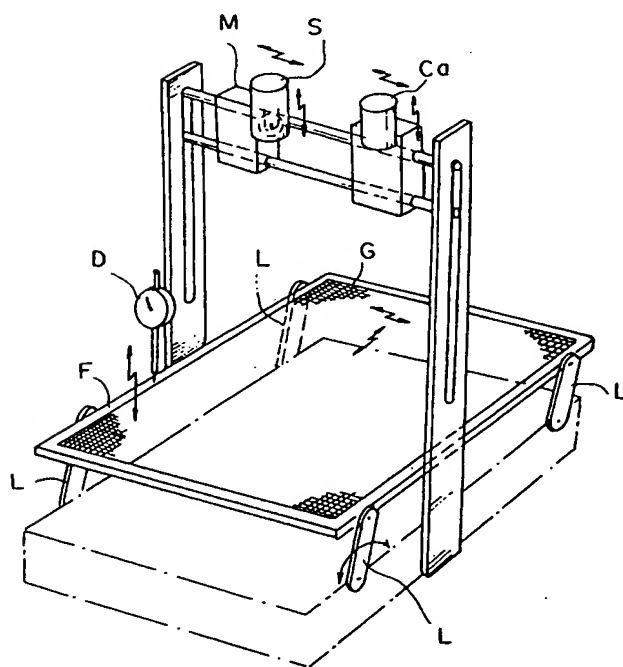
第 2 図



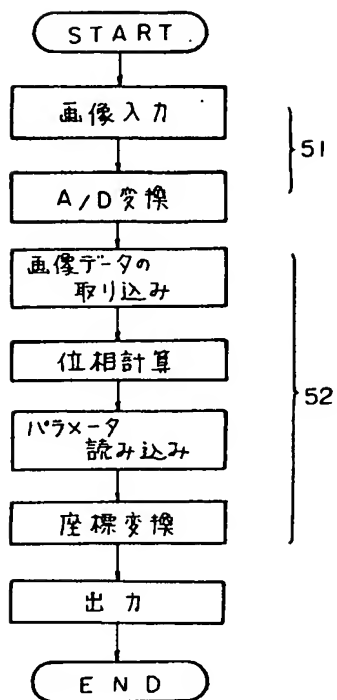
第 3 図



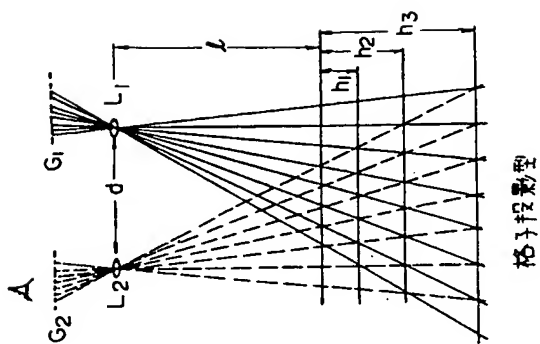
第 4 図



第 5 図



第 6 図



第 7 図

